

**Utilização de asfalto reciclado em misturas para camadas de base e sub-base de pavimentos**

**Raphael Britto Moura Lins**

Mestrando, UPE, Brasil

rbml@poli.br

**Yêda Vieira Póvoas**

Professora Doutora, UPE, Brasil

yvp@poli.br

**Micael Justino da Silva Júnior**

Mestrando, UPE, Brasil

mjsj@poli.br

**José Orlando Vieira Filho**

Doutor, UFPE, Brasil

ciclano@hotmail.com

Submissão: 14/05/2025

Aceite: 17/06/2025

LINS, Raphael Britto Moura; PÓVOAS, Yêda Vieira; SILVA JÚNIOR, Micael Justino da; VIEIRA FILHO, José Orlando.

Utilização de asfalto reciclado em misturas para camadas de base e sub-base de pavimentos. **Revista Nacional de**

**Gerenciamento de Cidades** , [S. I.], v. 13, n. 88, 2025. DOI: [10.17271/23188472138820255776](https://doi.org/10.17271/23188472138820255776). Disponível

em: [https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento\\_de\\_cidades/article/view/5776](https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/gerenciamento_de_cidades/article/view/5776)

Licença de Atribuição CC BY do Creative Commons <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

## **Utilização de asfalto reciclado em misturas para camadas de base e sub-base de pavimentos**

### **RESUMO**

**Objetivo** – Esta pesquisa busca avaliar o desempenho mecânico de misturas entre solo natural RAP para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos.

**Metodologia** – Foram realizados ensaios de granulometria, limites de consistência, compactação e índice de suporte Califórnia (ISC) para amostras de solo natural e misturas solo/RAP, substituindo o solo nas proporções 30%, 40% e 50% de RAP. Também foram ensaiadas misturas trocando o RAP por Resíduos de Construção e Demolição (RCD) nas mesmas proporções supracitadas, além das misturas RAP/pó de pedra/brita nas proporções 70%/30%/0%, 60%/40%/0% e 50%/40%/10%.

**Originalidade/relevância** – O estudo apresenta ensaios técnicos de laboratório com misturas a partir de solo com baixas capacidades de suporte, visando um aumento prático com vistas à utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos. A utilização de diferentes tipos de materiais e de proporções de misturas apresentam uma maior variedade de resultados.

**Resultados** – A incorporação de RAP e RCD ao solo natural melhora suas propriedades geotécnicas, tornando-o mais adequado para pavimentação, aumentando em até seis vezes os valores originais de ISC. O RAP se destacou ao aumentar a capacidade de suporte, sendo eficaz para sub-bases. Já a combinação de RAP com brita atendeu aos requisitos para bases de tráfego leve e pesado, oferecendo uma solução sustentável e tecnicamente viável para pavimentos, com maior durabilidade e menor uso de recursos naturais.

**Contribuições teóricas/metodológicas** – Este estudo apresenta importantes contribuições teóricas ao aprofundar a compreensão sobre a estabilização de solos siltosos e argilosos com materiais reciclados, demonstrando a superioridade do RAP em relação ao RCD na melhoria da resistência e capacidade de suporte. Do ponto de vista metodológico, destaca-se pela utilização de ensaios normatizados do DNT, pela investigação de diferentes composições de misturas e pela incorporação de critérios técnicos e sustentáveis. Os achados indicam alternativas viáveis e ambientalmente responsáveis para aplicação em camadas de sub-base e base de pavimentos, inclusive em vias de tráfego intenso, com potencial de uso prático na engenharia rodoviária.

**Contribuições sociais e ambientais** – Diante da carência de infraestrutura rodoviária e da escassez de materiais para pavimentação, a reutilização do resíduo de pavimento asfáltico (RAP) surge como uma solução sustentável. Essa prática contribui para a redução do passivo ambiental, promove o reaproveitamento de materiais descartados e apoia o desenvolvimento da infraestrutura nacional, gerando benefícios sociais e ambientais.

**PALAVRAS-CHAVE:** Pavimento flexível. Materiais asfálticos. Sustentabilidade.

## **Use of recycled asphalt in mixtures for pavement base and subbase layers**

### **ABSTRACT**

**Objective** – This research aims to evaluate the mechanical performance of mixtures composed of natural soil and Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for application in pavement base and sub-base layers.

**Methodology** – Laboratory tests were conducted, including grain size distribution, Atterberg limits, compaction, and California Bearing Ratio (CBR) on samples of natural soil and soil/RAP mixtures, replacing the soil with 30%, 40%, and 50% RAP. Additionally, mixtures with Construction and Demolition Waste (CDW) replacing RAP in the same proportions were tested, as well as RAP/stone dust/crushed stone mixtures in the ratios of 70%/30%/0%, 60%/40%/0%, and 50%/40%/10%.

**Originality/Relevance** – The study presents technical laboratory analyses involving low-support-capacity soils, aiming to enhance their performance for use in pavement base and sub-base layers. The inclusion of different material types and mix proportions provides a broader range of performance outcomes.

**Results** – The incorporation of RAP and CDW into natural soil improves its geotechnical properties, making it more suitable for pavement applications, with CBR values increasing by up to six times. RAP was especially effective in improving load-bearing capacity, making it suitable for sub-base layers. Moreover, combining RAP with crushed stone met the requirements for base layers under both light and heavy traffic, offering a sustainable and technically viable pavement solution with increased durability and reduced consumption of natural resources.

**Theoretical/Methodological Contributions** – This study offers significant theoretical contributions by advancing the understanding of stabilizing silty and clayey soils using recycled materials, highlighting the superior performance of RAP over CDW in terms of strength and support capacity. Methodologically, the research stands out for employing standardized DNIT testing procedures, evaluating various material compositions, and integrating technical and sustainability criteria. The findings suggest practical and environmentally responsible alternatives for use in pavement base and sub-base layers, including those subjected to heavy traffic, with strong applicability in road engineering.

**Social and Environmental Contributions** – Considering the shortage of road infrastructure and the limited availability of natural paving materials, the reuse of asphalt waste (RAP) emerges as a sustainable solution. This approach helps reduce environmental liabilities, encourages the reuse of discarded materials, and supports the development of national infrastructure, generating both social and environmental benefits.

**KEYWORDS:** Flexible pavement. Asphalt materials. RAP. CDW. Sustainability.

## Utilización de asfalto reciclado en mezclas para capas de base y sub-base de pavimentos

### RESUMEN

**Objetivo** – Esta investigación tiene como objetivo evaluar el desempeño mecánico de mezclas compuestas por suelo natural y pavimento asfáltico reciclado (RAP) para su aplicación en capas de base y subbase de pavimentos.

**Metodología** – Se realizaron ensayos de granulometría, límites de consistencia, compactación e Índice de Soporte de California (CBR) en muestras de suelo natural y mezclas suelo/RAP, sustituyendo el suelo en proporciones del 30%, 40% y 50% de RAP. También se ensayaron mezclas sustituyendo el RAP por Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en las mismas proporciones, así como mezclas RAP/polvo de piedra/piedra triturada en proporciones de 70%/30%/0%, 60%/40%/0% y 50%/40%/10%.

**Originalidad/Relevancia** – El estudio presenta análisis técnicos de laboratorio con mezclas elaboradas a partir de suelos con baja capacidad de soporte, con el objetivo de mejorar su desempeño para su uso práctico en capas de subbase y base de pavimentos. El uso de distintos tipos de materiales y proporciones de mezcla ofrece una mayor variedad de resultados.

**Resultados** – La incorporación de RAP y RCD al suelo natural mejora sus propiedades geotécnicas, haciéndolo más adecuado para la pavimentación, con incrementos de hasta seis veces en los valores originales de CBR. El RAP se destacó por mejorar significativamente la capacidad de soporte, siendo eficaz para capas de subbase. La combinación de RAP con piedra triturada cumplió los requisitos para capas de base en vías de tráfico liviano y pesado, representando una solución sostenible y técnicamente viable, con mayor durabilidad y menor consumo de recursos naturales.

**Contribuciones teóricas/metodológicas** – Este estudio aporta importantes contribuciones teóricas al profundizar la comprensión sobre la estabilización de suelos limosos y arcillosos con materiales reciclados, demostrando la superioridad del RAP respecto al RCD en la mejora de la resistencia y capacidad de soporte. Desde el punto de vista metodológico, se destaca por el uso de ensayos estandarizados según las normas del DNIT, la evaluación de distintas composiciones de mezcla y la incorporación de criterios técnicos y sostenibles. Los resultados indican alternativas viables y ambientalmente responsables para su aplicación en capas de base y subbase de pavimentos, incluso en vías de tráfico intenso, con alto potencial de aplicación en la ingeniería vial.

**Contribuciones sociales y ambientales** – Frente a la escasez de infraestructura vial y de materiales naturales para pavimentación, la reutilización del RAP se presenta como una solución sostenible. Esta práctica contribuye a la reducción del pasivo ambiental, fomenta el reaprovechamiento de materiales descartados y apoya el desarrollo de la infraestructura nacional, generando beneficios sociales y ambientales.

**PALABRAS CLAVE:** Pavimento flexible. Materiales asfálticos. RAP. RCD. Sostenibilidad.

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento acelerado de projetos de infraestrutura em países tanto desenvolvidos quanto em desenvolvimento tem gerado uma intensa busca por agregados naturais na indústria da construção. Essa demanda crescente tem levado à exaustão de recursos naturais, gerando preocupações ambientais, além de contribuir para o aumento dos custos desses materiais (Barmade; Patel; Dhamaniya, 2022).

Com a crescente conscientização em relação à implementação de sistemas de transporte sustentáveis, observa-se um aumento significativo no uso de materiais reciclados e subprodutos industriais na construção de rodovias. O progresso e a chegada de novos equipamentos ao mercado vêm trazendo novas opções de inovações para a construção de pavimentos. Um exemplo é a prática de remover completamente pavimentos de asfalto deteriorados e empregar o material resultante como base para a construção de novos pavimentos, reduzindo a necessidade de introdução de novos materiais (Camargo et al., 2013; Bonfim, 2021).

O Recycled Asphalt Pavement – RAP (também conhecido por Reclaimed Asphalt Pavement), resíduos de pavimento asfáltico, é originado a partir do processo de fresagem do revestimento deteriorado existente. Quando tratado adequadamente com processos de Trituração e peneiramento, este tipo de material se transforma em um agregado bem graduado e de alta qualidade. O RAP tem emergido como uma opção mais sustentável em comparação aos materiais convencionais, contribuindo para a diminuição do uso de recursos naturais na construção de rodovias (Bilodeau; Gonzalez, 2021).

A vida útil de uma rodovia pode variar de acordo com a intensidade de uso e frequência de manutenção (Jullien; Dauvergne; Proust, 2015). Bernucci et al. (2022) defendem que ao avaliar um trecho ao longo dos anos, a redução na capacidade de servir ao usuário resulta em uma análise do desempenho da superfície da estrada. Isso pode ser usado para determinar as fases da vida útil da estrada e estabelecer critérios para o momento adequado para realizar intervenções de manutenção. Jiang et al. (2021) afirmam que para pavimentos asfálticos tradicionais a durabilidade média corresponde a 15 anos.

Nos últimos anos, diversos estudos vêm trazendo alternativas que buscam conciliar uma melhoria do material asfáltico tanto do ponto de vista mecânico, quanto do ponto de vista ambiental. Exemplos de estudos que seguem indicam essa linha são Bastos et al. (2020), que indicou que a substituição parcial do agregado miúdo por resíduos de polietileno tereftalato (PET) em misturas asfálticas, e Kowalski e Masiero (2020) que avalia sistemas de medições de temperatura superficial de pavimentos urbanos.

Saha e Mandal (2017), Seferoğlu, Seferoğlu e Akpinar (2018) além de (Kolay e Singh, 2016) demonstram que a utilização de um material formado com 100% de RAP apresenta baixas capacidades geotécnicas para aplicação em camadas de sub-base e base de pavimentos. Desta forma, buscando uma melhoria das características de suporte da mistura, faz-se necessária a utilização de misturas com solos locais e agregados, podendo considerar também agentes estabilizantes como cal, cimento, escória de alto forno, emulsões asfálticas e bagaço de cana-de-açúcar (Mohanty; Mohapatra; Nayak, 2022).

Uma vez que existe uma carência de infraestrutura rodoviária nacional, associado à

escassez de materiais próprios para pavimentação, bem como ao passivo ambiental gerado pelo armazenamento do resíduo do pavimento asfáltico, fica evidente a possibilidade de utilização deste resíduo para inclusão em camadas de base e sub-base, contribuindo para uma solução sustentável a fim de suprir a escassez de materiais, fomentando o desenvolvimento da infraestrutura nacional.

## 2 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é avaliar o desempenho mecânico de misturas de solo natural com RAP para aplicação em camadas de base e sub-base de pavimentos rodoviários. Para tanto, foram realizados ensaios de composição granulométrica, limites de liquidez e plasticidade, compactação e índice de suporte Califórnia (ISC) para amostras de solo natural, tomado como referência, e misturas solo natural/RAP, substituindo o solo natural nas proporções 30%, 40% e 50% de RAP. Adicionalmente, também foram ensaiadas misturas trocando o RAP por Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (solo natural/RCD), nas mesmas proporções supracitadas, além das misturas RAP/pó de pedra/brita nas proporções 70%/30%/0%, 60%/40%/0% e 50%/40%/10%, buscando-se traçar um paralelo entre os resultados obtidos.

## 3 METODOLOGIA

Para atender o desenvolvimento da pesquisa, foi então realizada a coleta de materiais em jazida e usinas, bem como a definição das proporções das misturas e preparação das amostras a serem ensaiadas. Por fim, foram realizados ensaios de laboratório com as citadas amostras e análise dos respectivos resultados obtidos.

### 3.1 Coleta e preparação dos materiais utilizados

O solo natural, RAP, RCD e material britado utilizados são predominantes na Região Metropolitana do Recife, estado de Pernambuco. Para o caso do solo natural, foram ensaiadas 09 amostras de Jazida local.

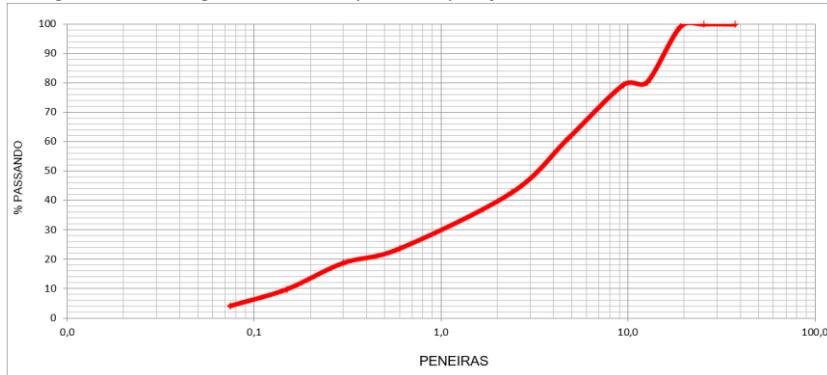
Os materiais de RAP foram coletados em usina de reciclagem local e sua respectiva composição pode ser observada no Quadro 1. Na Figura 1, é apresentada a curva granulométrica da mistura final do RAP utilizada no estudo.

Quadro 1 - Composição da mistura do RAP utilizado no estudo.

Materiais utilizados na composição final da mistura de RAP	Proporção de cada material na composição da mistura RAP
Brita 19 mm - RAP	25%
Brita 9,5 mm - RAP	25%
Pó de Pedra - Pedreira	50%

Fonte: Autores (2025).

Figura 1 – Curva granulométrica para composição da mistura do RAP utilizada.



Fonte: Autores (2025).

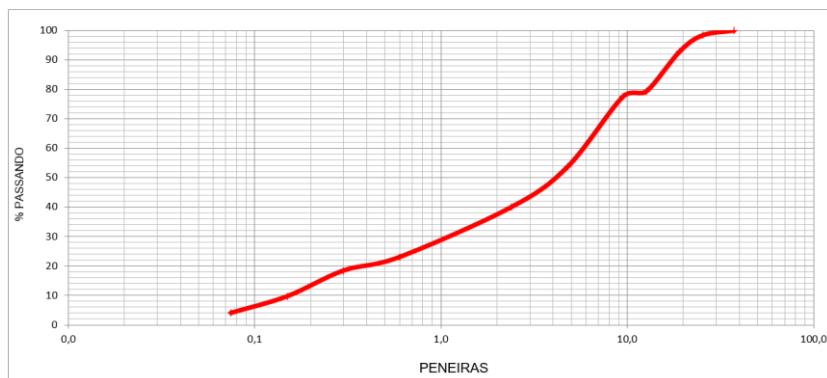
Assim como os materiais de RAP, os resíduos de RCD foram igualmente de usina de reciclagem, com respectivos teores apresentados no Quadro 2. A curva granulométrica da mistura consta na Figura 2.

Quadro 2 - Composição da mistura do RCD utilizado no estudo.

Materiais utilizados na composição final da mistura de RCD	Proporção de cada material na composição da mistura RCD
Brita 19 mm – RCD	20%
Brita 9,5 mm – RCD	30%
Pó de Pedra - Pedreira	50%

Fonte: Autores (2025).

Figura 2 – Curva granulométrica para composição da mistura do RCD utilizada.



Fonte: Autores (2025).

Para utilização no estudo, foram também incluídas composições incluindo materiais britados (brita 19 mm e 12,5 mm) e pó de pedra, originados de pedreira local.

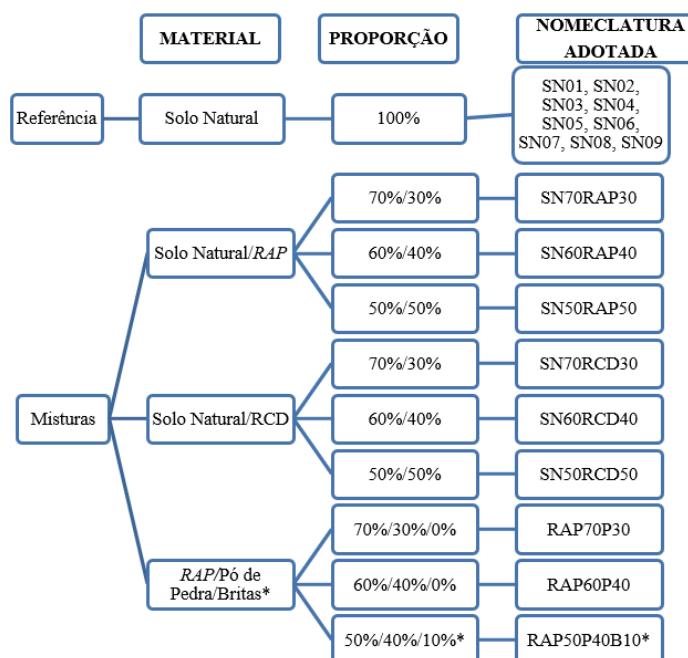
Um dos objetivos da pesquisa é a discussão quanto ao tipo de mistura que apresente características geotécnicas mais apropriadas para utilização em camadas de base e sub-base de pavimentos. Assim, durante os ensaios de laboratório, diferentes misturas foram testadas a fim de se definir a influência dos materiais utilizados nos resultados obtidos.

Com base na literatura analisada, foram preparadas misturas em diferentes proporções para os seguintes materiais: solo natural, RAP, RCD e britas 19,5 mm e 12,5 mm e

pó de pedra.

Como citado anteriormente, foram realizados ensaios de referência com o solo natural coletado da jazida de forma isolada e com misturas com RAP e RCD. As misturas entre solo/RAP e solo/RCD foram realizadas nas respectivas proporções de 70%/30%, 60%/40% e 50%/50%. Além disso, misturas entre RAP/pó de pedra/britas foram elaboradas nas mesmas proporções de 70%/30%/0%, 60%/40%/0% e 50%/40%/10%. O detalhamento de todas as 18 amostras ensaiadas (compostas ou não por misturas) é apresentado na Figura 3.

Figura 3 –Detalhamento dos materiais ensaiados e respectivas nomenclaturas



Fonte: Autores (2025).

### 3.2 Realização dos ensaios de laboratório

O solo natural, RAP, RCD e material britado utilizados são predominantes na Região Metropolitana do Recife, estado de Pernambuco. Para o caso do solo natural, foram ensaiadas 09 amostras de Jazida local. Os ensaios realizados com as amostras citadas foram: análise granulométrica por peneiramento, determinação do limite de liquidez, determinação do limite de plasticidade, ensaio de compactação – energia do Proctor normal, intermediário e modificado, índice de suporte Califórnia (ISC) – energia do Proctor normal, intermediário e modificado.

Buscando o atendimento às especificações constantes do Quadro 3 para camadas de base e sub-base, foram realizados ensaios com o solo natural (referência) e as misturas solo/RAP e solo/RCD. A mistura RAP/pó de pedra/britas, teve o seu estudo direcionado apenas na utilização de camadas de base. Para o solo natural, brita 19 mm, brita 12,5 mm, pó de pedra, RAP e RCD, foram realizados ensaios de granulometria para caracterização do material conforme

especificação normativa.

Quadro 3 - Especificações normativas do DNIT para utilização de materiais granulares em camadas de base e sub-base de pavimentos.

Especificação	Limites de Consistência	ISC	Expansão
Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço	-	$\geq 20\%$	$\leq 1,0\%$
Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço	Limite de Liquidez – LL $\leq 25\%$ Índice de Plasticidade – IP $\leq 6\%$	$\geq 60\%$ (tráfego leve) $\geq 80\%$ (tráfego pesado)	$\leq 0,5\%$

Fonte: Autores (2025).

Para o estudo com as amostras em solo natural de Jazida, foi utilizada a energia do Proctor normal. Assim sendo, buscando realizar comparações com os valores obtidos nas demais misturas realizadas, seguiu-se a correlação apresentada em Sreelekshmypadai e Vinod (2019) na qual convertem-se estes resultados para a energia tanto do Proctor intermediário quanto do Proctor modificado. Os autores observaram que o valor do ISC no Proctor modificado é cerca de 25% maior que o valor obtido na energia do Proctor Intermediário que por sua vez é cerca de 43% maior que o resultado no Proctor Normal.

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os materiais naturais ensaiados originados de Jazida apresentaram características geotécnicas médias referentes a um silte arenoso, não plástico, com ISC médio = 4%, Expansão médio = 2,3%, para a energia do Proctor Normal, atendendo às especificações do DNIT 108/2009 - ES para camadas de corpo de aterro de terraplenagem (ISC  $\geq 2\%$  e Expansão  $\leq 4,0\%$ ). Uma vez que os ensaios de compactação e ISC foram realizados na energia do Proctor normal, fez-se necessária a conversão para as energias do Proctor intermediário e modificado, buscando possibilitar um comparativo com os resultados obtidos nos ensaios realizados com as misturas com RAP e RCD. Assim, foi obtido um valor convertido médio de 6% para a energia do Proctor intermediário e de 8% para a energia do Proctor modificado.

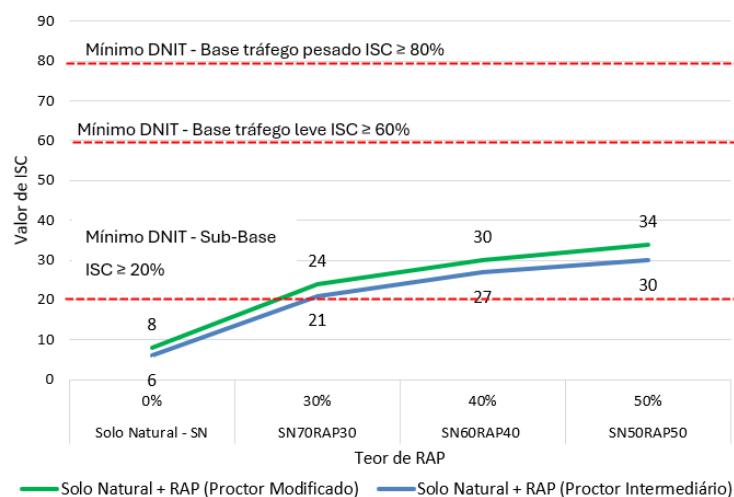
Os resultados obtidos nos ensaios realizados nesta pesquisa apresentaram uma alteração significativa no comportamento das amostras a partir das misturas realizadas com o RAP e RCD.

Com base em misturas solo natural/RAP com teores de RAP de 30%, 40% e 50%, foi observado um aumento no valor do ISC a medida em que esta proporção iria sendo acrescida, com respectivos resultados de 21%, 27% e 30% para a energia do Proctor intermediário, enquanto o valor convertido para o solo natural se dava na ordem de 6%. Desta forma, as três misturas realizadas passaram a atender assim, às especificações vigentes para utilização de

materiais em camadas de sub-base, que exigem um valor mínimo de 20% para a energia do Proctor Intermediário.

Com o aumento da energia para o Proctor modificado, visando a utilização em camadas de base de pavimentos, os valores de ISC obtidos foram de 24%, 30% e 34% para as respectivas adições de 30%, 40% e 50% de RAP, enquanto o valor convertido para o solo natural era de apenas 8%. Portanto, foi observado um aumento em relação aos valores obtidos para a energia do Proctor Intermediário para as mesmas proporções, enquanto os resultados mantiveram o comportamento de crescimento à medida em que os teores de RAP eram acrescentados. Apesar do aumento considerável, ainda assim não foi possível o atendimento à especificação atual para camadas de base de pavimentos, que exige  $ISC \geq 60\%$  para tráfego leve e  $ISC \geq 80\%$  para tráfego pesado. Os resultados de ISC para as misturas entre solo/RAP são observados na Figura 4.

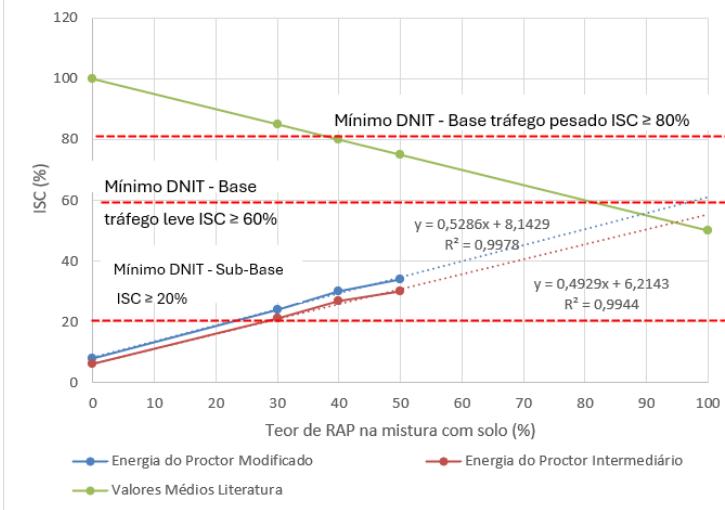
Figura 4 – Valor do ISC em função das proporções de mistura entre solo natural/RAP.



Fonte: Autores (2025).

A partir dos resultados obtidos, é possível observar uma tendência de crescimento linear do ISC a medida em que o teor de RAP aumenta na mistura. Verificado por meio do software “excel”, o comportamento linear é comprovado por meio de coeficiente de terminação ( $R^2$ ) = 0,9978 para as amostras da energia do Proctor Modificado e de  $R^2$  = 0,9948 para a energia do Proctor Intermediário. Desta forma, ajustando uma reta seguido a função obtida pelo software, é possível extrapolar o valor de ISC para o cenário de uma amostra composta apenas de RAP com um valor aproximado a 61% para a energia do Proctor modificado e 55% para energia do Proctor intermediário. Assim, observa-se que o comportamento do RAP encontrado assemelha-se ao verificado na literatura, confirmando bom enquadramento aos padrões internacionais estudados. Dessa forma, conforme Figura 5, a tendência de crescimento da resistência da mistura está diretamente ligada à capacidade do solo natural, uma vez que caso o mesmo possua um valor de ISC superior ao do RAP, haverá uma tendência de queda neste valor para a mistura realizada, concluindo-se também o cenário oposto de aumento no valor da mistura para um solo natural com ISC inferior ao do RAP.

Figura 5 – Comparação dos valores de ISC de solo natural/RAP com a literatura.

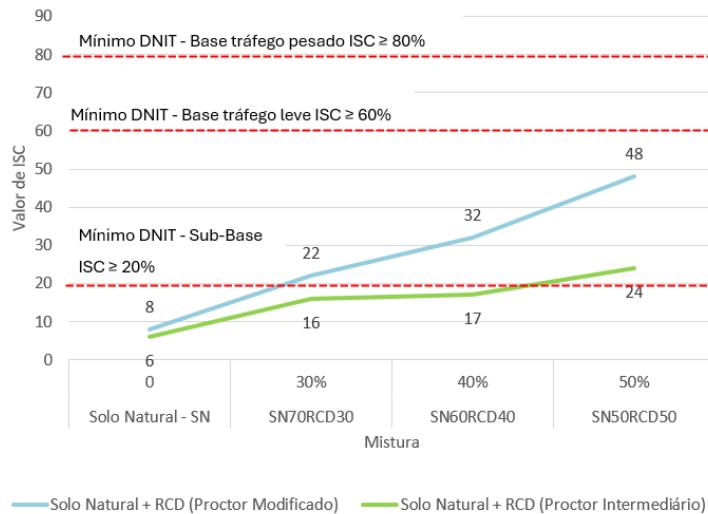


Fonte: Autores (2025).

Para as misturas entre solo natural/RCD, os valores de ISC obtidos para as proporções de 70%/30%, 60%/40%, 50%/50% foram respectivamente de 16%, 17% e 24%, consideravelmente inferiores aos valores obtidos para as misturas solo natural/RAP nas mesmas proporções. Ainda assim, houve um considerável aumento em relação à condição do solo natural sem mistura com ISC = 6%. Apesar do incremento na capacidade de suporte com a adição de RCD ao material, apenas a proporção de 50%/50% com solo natural atende às especificações de ISC ≥ 20% para camadas de sub-base de pavimentos.

Para aplicação em camadas de base de pavimentos, os ensaios solo natural/RCD realizados na energia do Proctor modificado apresentaram resultados inferiores ao estudo para solo natural/RAP, com valores de 22%, 32% e 48% nas respectivas proporções com solo natural de 70%/30%, 60%/40%, 50%/50%. Apesar do aumento em relação à condição natural, não houve o atendimento das misturas às especificações para utilização em camadas de base de pavimentos, que exige ISC ≥ 60% para tráfego leve e ISC ≥ 80% para tráfego pesado. Os resultados obtidos do ensaio de ISC entre solo natural/RCD, tanto para energia do Proctor intermediário, quanto para o Proctor modificado, podem ser observados na Figura 6.

Figura 6 – Valor do ISC em função das proporções de mistura entre solo natural/RCD.



Fonte: Autores (2025).

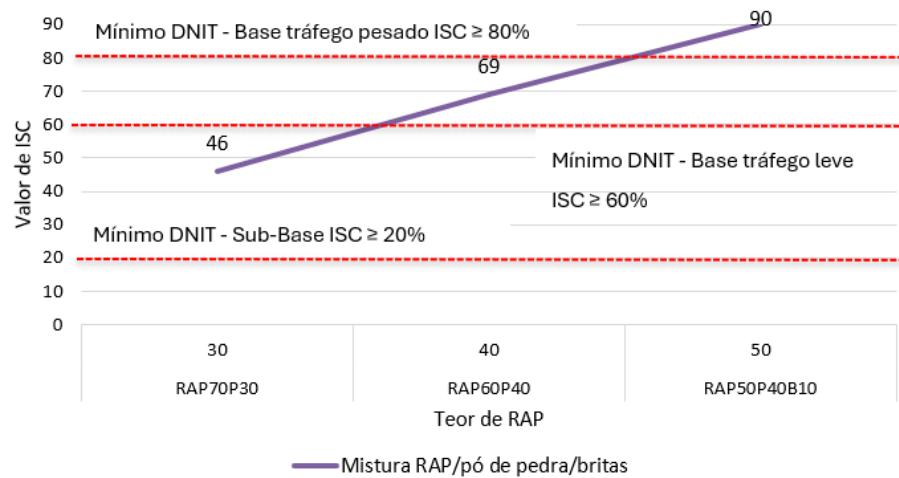
O critério de expansão também sofreu interferência da presença do RAP e RCD, reduzindo para um valor próximo de zero, atendendo para camadas de sub-base e base de pavimentos respectivamente, com valores máximos especificados de 1,0% e 0,5%, com exceção das misturas do solo natural com RAP e com o RCD na proporção de 70%/30%.

Sendo considerados como parâmetros fundamentais para execução do processo de execução terraplenagem e pavimentação no que diz respeito à homogeneização e compactação dos materiais, foram também analisados os resultados obtidos por meio do ensaio de compactação nas energias do Proctor intermediário e modificado, tanto para as misturas com solo natural/RAP e solo natural/RCD. A densidade máxima seca, juntamente com a umidade ótima, sofreu leves alterações à medida em que ocorreram as variações de proporções. Enquanto a primeira possuiu um crescimento com o acréscimo do RAP, a umidade ótima sofreu uma diminuição.

Com a adição de RAP e RCD, ocorreram variações nas características plásticas dos materiais, no qual as amostras SN03, SN04 e SN09, antes plástica com respectivos índices de plasticidade de 21%, 17% e 19% passaram a possuir características não plásticas. Além disso, todas as amostras que antes possuíam características de materiais siltosos ou argilosos passaram a possuir propriedades predominantemente granulares tendo em vista a diminuição na porcentagem de material passante na peneira Nº 200 mm (0,075 mm). Esta constatação indica uma melhora nas características do material para a finalidade desejada de pavimentação, uma vez que materiais finos como silte e argila possuem baixas características de suporte e ainda, para o caso desta última, altas características plásticas e expansivas.

Visando utilização em camadas de base de pavimentos, foram ainda realizadas novas misturas entre RAP e agregados britados do tipo brita 19,5 mm, brita 9,5 mm e pó de pedra em diferentes proporções. Os valores de ISC, na energia do Proctor Modificado, nas proporções de 70%/30%, 60%/40% e 50%/50%, foram de respectivamente 46%, 69% e 90%. A proporção de RAP/pó de pedra de 60%/40% atendeu à especificação para tráfego leve (ISC  $\geq$  60%) enquanto a proporção de 50%/50% atendeu tanto para tráfego leve quanto para tráfego pesado (ISC  $\geq$  80%). Os ensaios podem ser observados na Figura 7 juntamente com os parâmetros normativos.

Figura 7 – Valor do ISC em função das proporções de mistura entre RAP/pó de pedra/britas.



Fonte: Autores (2025).

Desta forma, com a adição de RAP e RCD, os materiais de Jazida outrora com capacidade apenas para utilização em camadas de corpo de aterro de terraplanagem em sua condição natural, passaram a possuir características para atendimento da utilização em camadas de sub-base e base de pavimentos. Da mesma forma, é possível a adoção do RAP em camadas de base desde que misturado materiais granulares britados. As proporções e suas finalidades constam do Quadro 4.

Quadro 4 - Proporções ensaiadas e suas finalidades de acordo com os resultados obtidos.

Proporção	Solo/RAP	Solo/RCD	RAP/Pó de Pedra/Brita
70%/30%	Reforço do Subleito Camada de Sub-base	Reforço do Subleito	Reforço do Subleito Camada de Sub-base
60%/40%	Reforço do Subleito Camada de Sub-base	Reforço do Subleito	Reforço do Subleito Camada de Sub-base Camada de Base (tráfego leve)
50%/50%	Reforço do Subleito Camada de Sub-base	Reforço do Subleito Camada de Sub-base	Reforço do Subleito Camada de Sub-base Camada de Base (tráfego leve) Camada de Base (tráfego pesado)

Fonte: Autores (2025).

## 5 CONCLUSÕES

Com base em ensaios realizados envolvendo solo natural e materiais do tipo RAP, RCD e agregados britados, conclui-se que:

- A adição de RAP e RCD ao solo natural modificou suas características, tornando solos siltosos e argilosos predominantemente granulares, o que melhorou sua adequação para pavimentação.
  - Nos ensaios de compactação, a densidade máxima seca aumentou com o acréscimo de RAP, enquanto a umidade ótima diminuiu, favorecendo a homogeneização e compactação dos materiais.
  - O critério de expansão foi reduzido a valores próximos de zero, atendendo às especificações do DNIT 139/2010 e 141/2022 para sub-base e base de pavimentos, respectivamente.
  - As misturas de solo natural com RAP apresentaram um aumento expressivo no ISC conforme a proporção de RAP foi ampliada, tanto para a energia do Proctor Intermediário quanto Modificado.
  - Em comparação com o RAP, as misturas de solo natural com RCD apresentaram desempenho inferior. Embora a adição de RCD tenha melhorado a capacidade de suporte em relação ao solo natural, os resultados indicam que o RAP é mais eficiente na melhoria da resistência das misturas, sendo mais adequado para atender às especificações do DNIT.
  - A adição de agregados britados ao RAP melhorou significativamente a capacidade de suporte das misturas, permitindo sua aplicação em camadas de base de pavimentos para tráfego leve e pesado, dependendo do teor de RAP.
  - Observa-se ainda que a resistência final da mistura depende da capacidade de suporte do solo natural, podendo aumentar ou diminuir conforme a relação entre os valores individuais de ISC dos materiais.

Conclui-se que a incorporação de RAP e RCD ao solo natural melhora suas características geotécnicas, tornando-os mais adequados para pavimentação. A adição de RAP foi mais eficiente na melhoria da capacidade de suporte, enquanto as misturas solo natural/RAP atenderam aos critérios para camadas de sub-base, mas não foram suficientes para cumprir os requisitos exigidos para base de pavimentos. A combinação de RAP com agregados britados mostrou-se a alternativa mais viável para camadas de base, atendendo às especificações para tráfego leve e pesado, representando uma solução sustentável e tecnicamente viável para a construção e reabilitação de pavimentos, com maior durabilidade estrutural e redução do consumo de recursos naturais.

Referente ao tema discutido, sugere-se que sejam realizados novas misturas incluindo RAP e RCD a fim de comprovar as hipóteses apresentadas. Além disso, sugere-se ensaios com diferentes proporções a fim de se comprovar o caráter linear dos resultados de ISC para as amostras entre solo natural/RAP. Por fim, sugere-se a utilização de solos naturais com diferentes características a fim de se comprovar a tendência de crescimento e decrescimento da capacidade de suporte com a adição do RAP.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 7180**: Solo - Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT. **NBR 9895**: Solo – Índice de suporte Califórnia (ISC) – Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 2016.

BARMADE, S.; PATEL, S.; DHAMANIYA, A. Performance evaluation of stabilized reclaimed asphalt pavement as base layer in flexible pavement. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, v. 26, n. 1, jan. 2022.

BASTOS, C.; et a. Mechanical and Thermal Performance of Hot Mix Asphalt (HMA) with Partial Replacement of Fine Aggregate by Polyethylene Terephthalate (PET) Waste. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 8, n. 58, 3 mai. 2020.

BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação Asfáltica** – Formação básica para engenheiros. 2ª edição. Rio de Janeiro: PETROBRÁS: ABEDA, 2022.

BILODEAU, J. P.; GONZALEZ, E. L. P. Permanent deformation analysis of base layers with recycled material: effect of density and stress level. **Transportation Geotechnics**, v. 27, 2021.

BONFIM, V. **Pavimento Sustentável**. São Paulo: Exceção Editorial, 2021.

CAMARGO, F. et al. Comparative assessment of crushed aggregates and bound/unbound recycled asphalt pavement as base materials. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 14, n. 3, p. 223–230, 1 abr. 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **DNIT 138/2010** – ES: Pavimentação – Reforço do Subleito - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **DNIT 139/2010** – ES: Pavimentação – Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT. **DNIT 141/2022** – ES: Pavimentação – Base estabilizada granulometricamente – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2022.

JIANG, Q.; WANG, F.; LIU, Q.; XIE, J.; WU, S. Energy consumption and environment performance analysis of induction-healed asphalt pavement by life cycle assessment (LCA). **Materials**, 14 (5), 1244 p. 2021.

JULLIEN, A.; DAUVERGNE, M.; PROUST, C. Road LCA: The dedicated ECORCE tool and database. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, 20 (5), 655-670 p. 2015.

KOLAY, P. K.; SINGH, P. **Resilient Modulus of a Blended Mixture of Recycled Asphalt Pavement and Natural Aggregate as Road Pavement Base Material**. Associate Professor; 2 Former Graduate Student. 2016.

KOWALSKI, L. F.; Masiero, E. Estudo Comparativo de Sistemas de Medições de Temperatura Superficial de Pavimentos Urbanos. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 8, n. 61, 23 jul. 2020.

MOHANTY, M., MOHAPATRA, S.; NAYAK, S. Efficacy of C&D waste in base/subbase layers of pavement–current trends and future prospectives: A systematic review. **Construction and Building Materials**, 340, 127726 p. 2022.

SAHA, D. C.; MANDAL, J. N. Laboratory Investigations on Reclaimed Asphalt Pavement (RAP) for using it as Base Course of Flexible Pavement. **Procedia Engineering**. Elsevier Ltd, 2017.

SEFEROĞLU, A. G.; SEFEROĞLU, M. T.; AKPINAR, M. V. Investigating the mechanical behavior of reclaimed asphalt pavement (RAP) bases in large scale test box. **Teknik Dergi/Technical Journal of Turkish Chamber of Civil Engineers**, v. 30, n. 6, p. 9581–9596, 2019.

SREELEKSHMYPILLAI, G.; VINOD, P. Prediction of CBR value of fine-grained soils at any rational compactive effort. *International Journal of Geotechnical Engineering*, v. 13, p. 560–565, 2019.

---

## DECLARAÇÕES

---

### CONTRIBUIÇÃO DE CADA AUTOR

Ao descrever a participação de cada autor no manuscrito, utilize os seguintes critérios:

- **Concepção e Design do Estudo:** Raphael Britto Moura Lins e Yêda Vieira Póvoas
  - **Curadoria de Dados:** Raphael Britto Moura Lins e Micael Justino da Silva Júnior.
  - **Análise Formal:** Raphael Britto Moura Lins
  - **Aquisição de Financiamento:** Yêda Vieira Póvoas
  - **Investigação:** Raphael Britto Moura Lins, Yêda Vieira Póvoas e José Orlando Vieira Filho.
  - **Metodologia:** Raphael Britto Moura Lins, Yêda Vieira Póvoas e José Orlando Vieira Filho.
  - **Redação - Rascunho Inicial:** Raphael Britto Moura Lins
  - **Redação - Revisão Crítica:** Raphael Britto Moura Lins, Micael Justino da Silva Júnior, Yêda Vieira Póvoas e José Orlando Vieira Filho.
  - **Revisão e Edição Final:** Raphael Britto Moura Lins, Micael Justino da Silva Júnior, Yêda Vieira Póvoas e José Orlando Vieira Filho.
  - **Supervisão:** Raphael Britto Moura Lins e Yêda Vieira Póvoas
- 

### DECLARAÇÃO DE CONFLITOS DE INTERESSE

Nós, [Raphael Britto Moura Lins, Yêda Vieira Póvoas, Micael Justino da Silva Júnior e José Orlando Vieira Filho], declaramos que o manuscrito intitulado "Utilização de asfalto reciclado em misturas para camadas de base e sub-base de pavimentos":

1. **Vínculos Financeiros:** Não possui/possui vínculos financeiros que possam influenciar os resultados ou interpretação do trabalho.
  2. **Relações Profissionais:** Não possui/possui relações profissionais que possam impactar na análise, interpretação ou apresentação dos resultados.
  3. **Conflitos Pessoais:** Não possui/possui conflitos de interesse pessoais relacionados ao conteúdo do manuscrito.
-